

# 超声电机减摩现象的仿真研究\*

任韦豪, 杨 淋

(南京航空航天大学航空学院 南京, 210016)

**摘要** 基于商用有限元软件自动增量式非线性动力学分析(automatic dynamic incremental nonlinear analysis, 简称 ADINA), 对超声电机的减摩现象进行仿真研究, 提出等效摩擦因数的概念。分别在驻波激励和行波激励下研究了超声电机启动响应过程的瞬时等效摩擦因数。通过仿真计算, 得到了不同预压力、激励频率和电压情况下的稳态等效摩擦因数。当预压力较小时, 驻波激励下的减摩效应强于行波激励; 当预压力较大时, 超声振动受到抑制, 此时 2 种激励方式的减摩效应近乎一致。研究发现: 激励频率越接近谐振频率, 预压力越小、驱动电压越大, 减摩效果就越显著; 其中, 激励频率和预压力的影响要大一些。本研究为超声电机减摩现象的研究与应用提供有益的帮助。

**关键词** 超声电机; 自动增量式非线性动力学分析; 减摩; 仿真; 等效摩擦因数

**中图分类号** TH113.1; TH117.1; TP319; TM356

## 引 言

近几十年来, 超声电机因其体积小、响应快、无电磁干扰、功率密度高和低速大扭矩等特点而得到了广泛研究<sup>[1]</sup>。随着超声电机的逐步成熟化和商业化, 其在航空航天、精密仪器、生物医疗和光学工程等领域得到了大量应用<sup>[2-3]</sup>。超声电机是利用超声振动产生的摩擦力来实现旋转或直线运动<sup>[1]</sup>。超声振动不仅会产生摩擦力, 还会导致减摩现象的发生<sup>[4]</sup>。研究者们从粒子微观振动和声悬浮的角度对这一现象进行了理论和实验研究<sup>[5-12]</sup>。研究发现: 超声振动改变了接触面之间的摩擦状态, 减小了实际接触面积; 同时, 振动力和声辐射压力可以降低接触面之间的压力。然而, 从有限元仿真模拟的角度对超声电机减摩现象的研究相对较少。

笔者基于商用有限元软件 ADINA, 对超声电机的减摩现象进行了仿真研究, 并提出等效摩擦因数的概念。分别在驻波激励和行波激励下, 研究了超声电机启动响应过程的瞬时等效摩擦因数。同时, 通过仿真计算, 得到了不同预压力、激励频率和电压情况下的稳态等效摩擦因数, 为超声电机减摩现象的研究与应用提供了帮助。

## 1 超声电机的结构和工作原理

行波旋转型超声电机是目前最典型、应用最广

泛的超声电机。压电材料的逆压电效应, 使定子体产生超声频段的振动, 通过与转子的摩擦产生驱动力, 进而将电能转化为机械能。图 1 为型号是 PMR45(南京航达超控科技有限公司生产)的行波旋转型超声电机样机, 笔者将其作为研究对象。图 2 为其结构爆炸图。该电机主要由定子、转子、压电陶瓷环、摩擦材料层、轴承和转轴等部件组成<sup>[13]</sup>。其中: 压电陶瓷环粘接在定子底侧; 摩擦材料层粘接在转子底侧, 通过轴向预压力与定子齿相接触。

将超声电机定、转子接触界面沿圆周方向展开, 得到如图 3 所示的超声电机工作原理示意图。当 2 个振幅和频率相同、相位差 90° 的交变电压分别作用于压电陶瓷环的 A, B 相时, 2 个振幅相同、时间和空间上相位差 90° 的模式会被同时激发出来, 进而叠加形成行波。若给转子施加适当的预压力, 定子齿面上的点会产生椭圆运动从而驱动转子, 即定子的微幅振动通过摩擦力转化为转子的旋转运动。

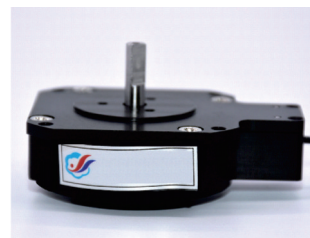


图 1 PMR45 型超声电机样机

Fig.1 Prototype of the PMR45 ultrasonic motor

\* 江苏省高校重点学科建设资助项目(PAPD)

收稿日期: 2022-02-11; 修回日期: 2022-03-15

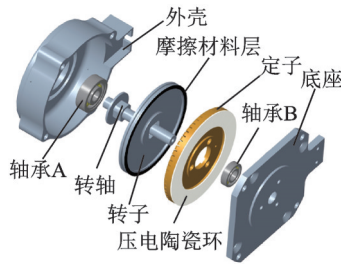


图 2 PMR45型超声电机结构爆炸图

Fig.2 Structural explosion diagram of the PMR45 ultrasonic motor

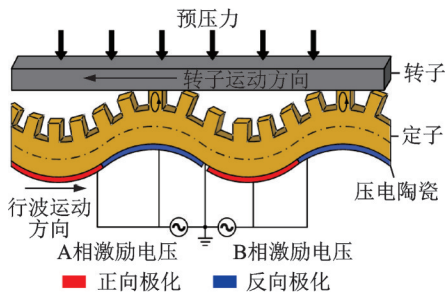


图 3 超声电机工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic motor's working principle

## 2 超声电机有限元仿真模型的建立

基于商用有限元软件 ADINA(该软件擅长计算接触机构中的非线性数值问题<sup>[14]</sup>),笔者建立了 PMR45 型超声电机的有限元仿真模型。图 4 为 PMR45 几何模型剖面图。为了兼顾仿真结果准确性和计算过程的效率性,选择二阶六面体单元(3D)和二阶四边形单元(2D)进行网格划分。电机的定子、转子和摩擦层分别由磷青铜、铝合金、聚四氟乙烯 (polytetrafluoroethylene, 简称 PTFE) 制成,常用材料参数如表 1 所示。粘贴在定子底侧的压电陶瓷环为 PZT-8H 型,其参数由 ADINA 软件内置材料模型提供,压电陶瓷的机电性能参数如表 2 所示。

图 5 为 PMR45 有限元模型,展示了该模型的接触设置、胶粘设置、约束条件和加载情况。图中:  $U_1, U_2, U_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3$  分别表示沿  $x$  轴的平移、沿  $y$  轴的

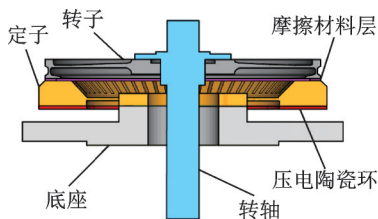


图 4 PMR45的几何模型剖面图

Fig.4 Section plan of the PMR45's geometric model

表 1 常用材料参数

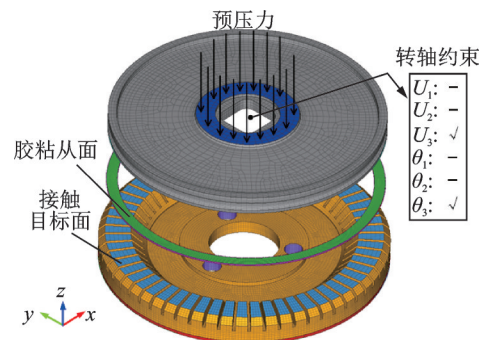
Tab.1 Constants of the common materials

材料	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模量/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )
磷青铜	8 780	0.33	$1.2\times 10^{11}$
铝合金	2 780	0.33	$7.1\times 10^{10}$
PTFE	2 100	0.30	$1.2\times 10^9$

表 2 压电陶瓷的机电性能参数

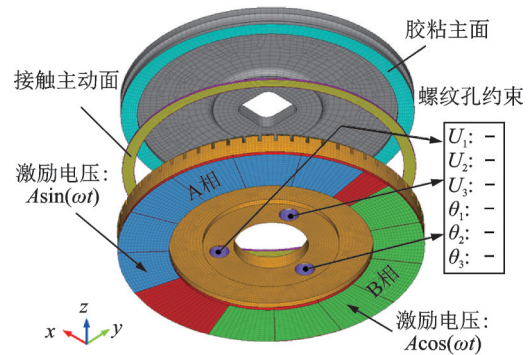
Tab.2 Electro-mechanical properties of the PZT

性能参数	符号	数值
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\rho$	7 500
泊松比	$\nu_{12}$	0.35
	$\nu_{13}, \nu_{23}$	0.38
弹性模量/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$E_1, E_2$	$6.1\times 10^{10}$
	$E_3$	$5.32\times 10^{10}$
剪切模量/( $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$G_{12}$	$2.26\times 10^{10}$
	$G_{13}, G_{23}$	$2.11\times 10^{10}$
压电耦合常数/( $\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$e_{13}, e_{23}$	-7.209
	$e_{33}$	15.118
介电常数/( $\text{C}\cdot(\text{V}\cdot\text{m})^{-1}$ )	$\epsilon_{11}, \epsilon_{22}$	$1.53\times 10^{-8}$
	$\epsilon_{33}$	$1.5\times 10^{-8}$



(a) 等距视图

(a) The isometric view



(b) 反向等距视图

(b) The reverse isometric view

图 5 PMR45有限元模型

Fig.5 Finite element model of the PMR45

平移、沿  $z$  轴的平移、绕  $x$  轴的旋转、绕  $y$  轴的旋转、绕  $z$  轴的旋转这 6 个自由度。基于 ADINA 软件的

开发者提出的约束函数法<sup>[15]</sup>,该仿真采用了库仑摩擦系数为0.2的接触模型,包含接触主动面和接触目标面。当1组接触对中的2个接触面都是柔性时,应将较硬的接触面作为目标面。在这种前提下,将由磷青铜制成的定子齿面设为目标面,将由聚四氟乙烯制成的摩擦材料层下表面设为主动面。此外,ADINA中提供了胶网设置,其允许不同网格模型的不同区域相互连接,从而产生更精确的约束。与接触对类似,胶网也包含1个主面和1个从面,其中面积较小的设为从面。在该有限元模型中,压电陶瓷环上表面作为从面粘在定子底侧表面,定子底侧表面设定为主面。同样,将转子底侧表面作为主面,摩擦材料层的上表面设置为从面。

根据工作原理,在压电陶瓷环的A相施加适当频率的 $400 V_{pp}$ 正弦交流电压。同时,在B相施加相同情况的余弦交流电压。适当的预压力通过转子的顶部表面施加。考虑轴承和底座的实际约束情况,在有限元模型中添加了若干边界条件。对于转子转动中心的约束,仅保留沿 $z$ 轴的平移和绕 $z$ 轴的旋转,这样可以避免轴的偏斜。同时,将定子的3个螺纹孔在各个自由度上都进行约束,避免定子在仿真过程中的刚体运动。

考虑到阻尼影响的必要性,该模型采用瑞利阻尼设置,表达式为

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

其中: $C$ 、 $M$ 和 $K$ 分别为阻尼矩阵、质量矩阵和刚度矩阵; $\alpha$ 和 $\beta$ 为由阻尼比 $\xi$ 和相应振动频率 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 所决定的常数。

$$\begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases} = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \begin{cases} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{cases}$$

在该模型中,阻尼比采用0.008(作为兼顾计算精度和效率的经验值),频率范围 $[\omega_1, \omega_2]$ 应覆盖PMR45电机的设计共振频率(36.3 kHz)和实际工作频率(37.0 kHz)。

### 3 仿真计算结果

通过仿真计算所得的电机模态、椭圆运动轨迹、输出性能曲线和有效应力云图可参见文献[13]。这里只对摩擦材料层接触面的摩擦情况进行分析。在任意时刻 $t$ ,接触界面的等效摩擦系数 $\mu_i$ 的表达式为

$$\mu_i = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} f_{ii}/N_{ii}}{n_i} \quad (2)$$

其中: $n_i$ 为该接触面的接触节点总数; $f_{ii}$ 和 $N_{ii}$ 分别为

接触面上节点 $i$ 的摩擦力和压力。

PMR45电机定子的固有频率约为36.3 kHz,电机正常工作在 $400 V_{pp}$ 电压、37.0 kHz频率和120 N预压力下<sup>[13]</sup>。笔者在此前提下对电机在驻波激励和行波激励下的等效摩擦系数进行了仿真研究。驻波激励即对电机只施加单相激励,只在压电陶瓷环的A相或B相施加1个频率合适的正弦波交流电压。在这种情况下电机定子上只能形成驻波,当外部转矩施加后,电机的转子可以被动旋转。行波激励即对电机施加双相激励,在A相施加1个频率合适的正弦交流电压,同时又在B相施加1个相同的余弦交流电。在这种情况下电机定子可以正常形成行波,此时电机的转子处于主动旋转状态。

图6为驻波激励和行波激励过程中不同情况下的等效摩擦系数响应曲线。由图6(a)可知,该电机

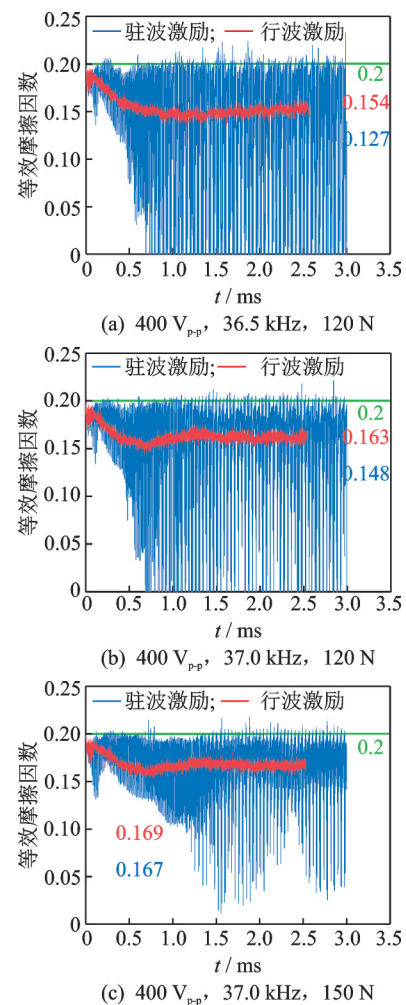


图6 驻波激励和行波激励过程中不同情况下的等效摩擦系数响应曲线

Fig.6 Response curves of equivalent friction coefficients during the standing wave excitation and traveling wave excitation process

在行波激励下达到稳态后的等效摩擦因数约为 0.154,在驻波激励下达到稳态后的等效摩擦因数均值约为 0.127,两者相差 0.027,此时驻波激励的超声减摩效果更明显。如图 6(b)所示,以该电机的实际工况为例,在驱动电压为  $400V_{pp}$ 、激励频率为 37.0 kHz、预压力为 120 N 的情形下,摩擦因数由 0.19 下降至 0.163,下降幅度约为 14.21%。如图 6(c)所示,当驱动电压和激励频率不变、预压力增大到 150 N 时,行波激励和驻波激励下的稳态等效摩擦因数分别为 0.169 和 0.167,相差无几。可见,在预压力较大的情况下,2 种激励方式带来的超声减摩现象在宏观层面几乎是相同的。

将图 6(b)中驻波激励下稳态时的响应曲线放大,得到如图 7 所示的驻波激励过程中稳态时的等效摩擦因数响应曲线 ( $400 V_{pp}$ , 37.0 kHz, 120 N)。可以看出:在电机启动的最初阶段,摩擦因数迅速由 0.2(设定的静摩擦因数)下降至 0.19(初始动摩擦因数);此后在驻波激励下,等效摩擦因数始终在 0~0.2 之间周期性振荡,其周期与激励周期 (0.03 ms) 几乎一致;而在行波激励下,等效摩擦因数从 0.19 逐渐变小,约 1 ms 后达到稳态。

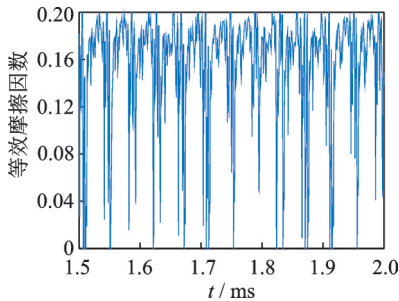


图 7 驻波激励过程中稳态时的等效摩擦因数响应曲线 ( $400 V_{pp}$ , 37.0 kHz, 120 N)

Fig.7 Steady state response curve of the equivalent friction coefficient during the standing wave excitation process ( $400 V_{pp}$ , 37.0 kHz, 120 N)

由于传统超声电机的驱动是双相激励,因此需要重点关注超声电机在行波激励过程中的超声减摩现象。通过仿真计算得到行波激励过程中不同情况下的稳态等效摩擦因数拟合曲线,如图 8 所示。从图 8(a)可知,由于减摩效应,稳态等效摩擦因数在 38.0 kHz 时约为 0.177(降低 6.84%),而在 36.5 kHz 时降至最低点 0.154(降低 18.95%),可见激励频率越接近谐振频率,超声振动就越强烈,减摩效应就越明显,进而导致稳态等效摩擦因数就越小。从图 8(b)可知,稳态等效摩擦因数在 60 N 时约为 0.155(降低 18.42%),在 150 N 时

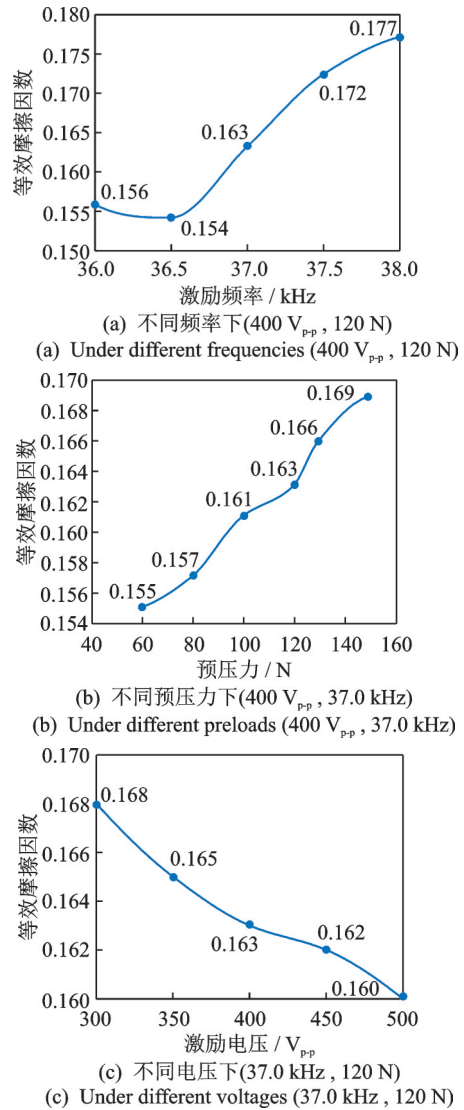


图 8 行波激励过程中不同情况下的稳态等效摩擦因数拟合曲线

Fig.8 Steady state equivalent friction coefficients during the traveling wave excitation process

约为 0.169(降低 11.05%),可见在其他条件不变的情况下,随着预压力的增加,稳态等效摩擦因数相应增大。从图 8(c)可以看出,随着驱动电压的变大,虽然等效摩擦因数相应变小,但变化幅度却十分微弱。综合来看,激励频率越接近谐振频率、预压力越小、驱动电压越大,超声减摩效果越显著;其中,激励频率和预压力的影响要大一些。

## 4 结束语

基于商用有限元软件 ADINA,在驻波激励和行波激励下,笔者对超声电机的减摩现象进行了仿真研究,并提出了等效摩擦因数的概念。同时,通过仿真计算,得到不同预压力、激励频率和电压下的等

效摩擦因数。在该电机的实际工况下,仿真得到的等效摩擦因数由初始动摩擦因数 0.19 最终下降至 0.163,下降幅度约为 14.21%。当预压力较小时,驻波激励下的超声减摩效应要强于行波激励;而当预压力较大,超声振动受到抑制,此时 2 种激励方式的超声减摩效应近乎一致。综合来看,激励频率越接近谐振频率、预压力越小、驱动电压越大,超声减摩效果就越显著。其中,激励频率和预压力的影响要大一些。本研究将为超声电机减摩现象的研究与应用提供有益的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] ZHAO C. Ultrasonic motors: technologies and applications[M]. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011: 1-13.
- [2] 潘松,肖忠,徐张凡,等. 聚合物定子超声电机驱动的变频激光扩束镜[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 855-862.  
PAN Song, XIAO Zhong, XU Zhangfan, et al. Multiple beam expander driven by ultrasonic motor with polymer-based stator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5): 855-862. (in Chinese)
- [3] 郑炬炬,孙志峻,闫鹤,等. 运用中空超声电机的血管介入手术机器人系统[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(5): 976-983.  
ZHENG Jujū, SUN Zhijun, YAN He, et al. Master-slave controlled robotic system based on hollow ultrasonic motor for vascular interventional surgery[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(5): 976-983. (in Chinese)
- [4] 程光明,邱晓阳. 超声振动减摩现象的研究[J]. 压电与声光, 1998, 20(5): 322-325.  
CHENG Guangming, QIU Xiaoyang. Study on ultrasonic vibration antifriction phenomenon[J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 1998, 20(5): 322-325. (in Chinese)
- [5] 彭太江,杨树臣,杨志刚,等. 超声波的减摩特性[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006(S2): 88-90.  
PENG Taijiang, YANG Shuchen, YANG Zhigang, et al. Experimental study on ultrasonic antifriction behavior[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(S2): 88-90. (in Chinese)
- [6] LITTMANN W, STORCK H, WALLASCHEK J. Reduction of friction using piezoelectrically excited ultrasonic vibrations [C] // Smart Structures and Materials 2001: Damping and Isolation. [S.l.]: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2001: 302-311.
- [7] LIEW J, CHEN Y, ZHOU T. The measurement on vibration friction coefficient of ultrasonic motor [C] // 2008 IEEE Ultrasonics Symposium. [S.l.]: IEEE, 2008: 154-156.
- [8] SEDNAOUI T, VEZOOLIE, DZIDEK B, et al. Experimental evaluation of friction reduction in ultrasonic devices [C] // 2015 IEEE World Haptics Conference. [S.l.]: IEEE, 2015: 37-42.
- [9] FRIESEN R, WIERTLEWSKI M, PESHKIN M, et al. The contribution of air to ultrasonic friction reduction [C] // 2017 IEEE World Haptics Conference. [S.l.]: IEEE, 2017: 517-522.
- [10] 曲建俊,田秀,孙凤艳. 基于行波型超声马达的超声波振动减摩试验研究[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(1): 73-77.  
QU Jianjun, TIAN Xiu, SUN Fengyan. Experiment study on friction reduction of ultrasonic vibration based on traveling wave ultrasonic motor[J]. Tribology, 2007, 27(1): 73-77. (in Chinese)
- [11] 王文浩,郭吉丰,金龙,等. 行波型超声波电机摩擦特性的实验研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(2): 168-173.  
WANG Wenhao, GUO Jifeng, JIN Long, et al. Experimental investigation on friction characteristics of ultrasonic motor[J]. Tribology, 2010, 30(2): 168-173. (in Chinese)
- [12] 周铁英,刘勇,袁世明,等. 声悬浮对超声减摩的影响[J]. 声学学报, 2004, 29(2): 111-114.  
ZHOU Tieying, LIU Yong, YUAN Shiming, et al. The effect of acoustic levitation on ultrasonic reducing friction [J]. Acta Acustica, 2004, 29(2): 111-114. (in Chinese)
- [13] REN W, YANG L, MA C, et al. Output performance simulation and contact analysis of traveling wave rotary ultrasonic motor based on ADINA [J]. Computers & Structures, 2019, 216: 15-25.
- [14] BATHE K J. ADINA theory and modeling guide volume I: ADINA solids & structures [M]. [S.l.]: ADINA R & D, Inc., 2021: 835-1045.
- [15] BATHE K J. Finite element procedures [M]. [S.l.]: Prentice-Hall, 1996: 626-628.



**第一作者简介:**任韦豪,男,1995年9月生,博士生。主要研究方向为超声电机设计、仿真与应用。

E-mail: renweihao@nuaa.edu.cn

**通信作者简介:**杨淋,男,1981年9月生,副教授、硕士生导师。主要研究方向为各类型超声电机及其系统的研发和产业化推广。

E-mail: yanglin@nuaa.edu.cn